基于固态变压器直流侧电压平衡控制的SVPWM算法

刘　凯　陈才学　文　军

（湘潭大学信息工程学院　湘潭　411105）



刘　凯　男　1991年生，硕士，主要从事电力电子技术、能源互联网方面的研究。



陈才学　男　1979年生，博士，副教授，主要从事电力电子技术、能源互联网方面的研究。

摘要：固态变压器作为能源互联网的核心设备具有电压等级转换和隔离的功能，可以有效地整合分布式可再生能源，但模块级联 H 桥型固态变压器也存在各个 H 桥模块之间的均压问题。本文首先研究了单相任意单元数级联 H 桥固态变压器的 SVPWM 及其电压平衡控制原理，提出一种固态变压器电压环控制一个 H 桥直流母线电压，然后通过在 SVPWM 中增加一个新控制环控制其他 H 桥的矢量脉冲宽度，从而使其他 H 桥电压跟随的控制策略来实现各个 H 桥均压的目的。最后通过仿真验证了所提控制策略的正确性。

关键词：固态变压器　单相级联 H 桥　均压

中图分类号：TM464

SVPWM With Voltage Balance Control in DC Side Based on the Solid-State Transformer

Liu Kai　Chen Caixue　Wen Jun

（College of Information Engineering Xiangtan University　Xiangtan　411105　China）

Abstract: Solid-state transformer has the function of conversion and isolation in different voltage grade as the important equipment of energy internet, and it can integrate distributed renewable energy effectively, but also has some imbalance problem in voltage. At first, the SVPWM of single-phase solid-state transformer cascaded by arbitrary number of H bridge and the principle of voltage balance control are studied in the paper. Then, a control strategy which control one of H bridge's voltage through solid-state transformer voltage control loop is proposed, and this strategy control other H bridge's voltage to follow master H bridge by adding a new control loop in the SVPWM which control the vector pulse width of each slave H bridge. Finally, the simulation verifies the correctness of strategy proposed.

Keywords: Solid-state transformer, single phase cascaded H bridge, voltage balance

1 引言

能源互联网作为当今电网提高供电可靠性和供电质量、整合分布式可再生能源的发展方向而受到广泛的重视。文献 [1-2] 提出了用于配电网的基于固态变压器的“能量互联网”的概念。目前固态变压器的研究以三级式拓扑的控制策略为主要目标，其具有能量控制的灵活性和功能的可实现性等优点 [3]。

H 桥级联固态变压器 AC/DC 侧采用多个 H 桥级联方式，具有降低各个模块电流电压应力的优点 [4]，但 H 桥级联固态变压器由于各个级联单元的结构不对称、元件不一致、延迟不一样及功率不平衡等会使级联单元直流母线电压出现不平衡而影响固态变压器及其控制系统的正常工作 [5]。文献 [6] 增加了辅助均压电路，具有控制系统简单等优点，但也存在电路拓扑复杂、成本高、损耗大等问题。文献 [7] 采用 3D-SVPWM 调制策略，无需辅助电路即可快速实现直流母线电压平衡控制；文献 [8] 采用单相 dq 解耦控制，采用重新分配 d 轴有功功率的方式来实现直流侧电容电压平衡控制，但两种方法计算过程复杂。为此，文献 [9] 采用单相 SVPWM 和叠加补偿分量调节冗余基本矢量作用时间的方法，快速调节直流母线电压，但局限于两个单位级联 H 桥的固态变压器。

本文研究单相 H 桥级联固态变压器的 SVPWM 调制和均压策略，针对单相多个 H 桥级联固态变压器的通用 SVPWM 方法存在的电压和功率不均问题，提出了一种控制单个 H 桥直流母线电压、调节其他 H 桥的脉冲宽度来使电压跟随的控制策略。最后通过仿真证明了该控制策略的可行性和正确性。

2 固态变压器

2.1 固态变压器在能源互联网中的作用

如图 1 所示，固态变压器作为能源互联网中的重要组成部分，不仅起到电能变换的作用，更重要的是维持了整个系统的兼容性和灵活性 [10]。固态变压器包含高压交流电网、交流负载、低压直流负载和直流母线四个端口，通过与各个电源和负载的信息共享来协调分布式能源、储能、负载和电网之间的能量流动，有效整合了分布式可再生能源，使分布式可再生能源系统与传统的发电系统的能源得到高效利用。

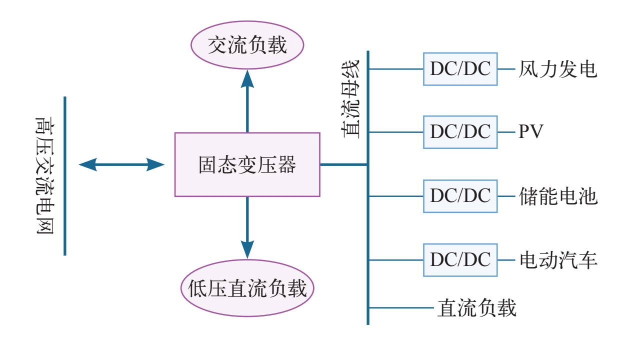


图 1 能源互联网结构

Fig.1 Structure of energy internet

2.2 固态变压器的拓扑

固态变压器的拓扑如图 2 所示 [11]。AC/DC 侧采用多个 H 桥模块级联而成，具有结构简单、扩展强和控制难度小的优点，不仅可以有效减小开关管的应力，同时还能提高等效开关频率，降低输入电流谐波，减小滤波电感的体积 [12]。DC/DC 隔离级采用移相全桥 DC/DC 变换电路（DAB），该电路结构简单、开关损耗小、控制方便，采用移相脉冲可实现其能量的双向流动。

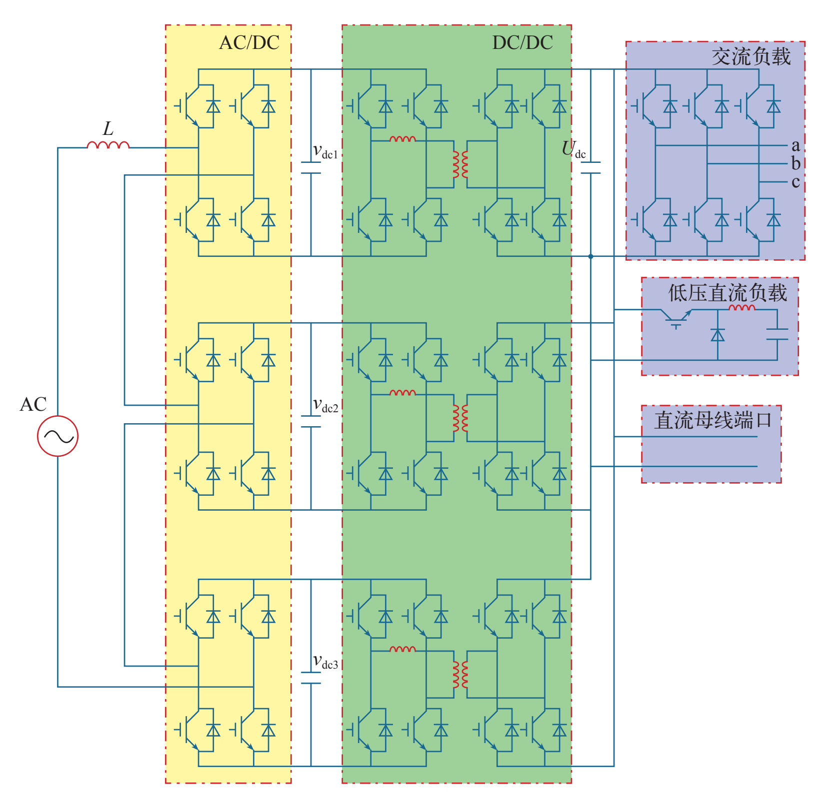


图 2 固态变压器拓扑

Fig.2 Topology of solid-state transformer

3　单相级联 H 桥变换器 SVPWM 算法

AC/DC 侧采用单相级联 H 桥变换器，单相级联 H 桥变换器拓扑如图 3 所示。u_s、i_s 分别为网侧输入电压和电流；L 为网侧电感；C_1、C_2、C_3 和 V_{dc1}、V_{dc2}、V_{dc3} 分别为 3 个 H 桥的直流母线电容和电压；R_1、R_2、R_3 分别为 3 个等效负载；S_{ij}（$i=1,2,3$；$j=1,2,3,4$）代表 H 桥的各个开关管。

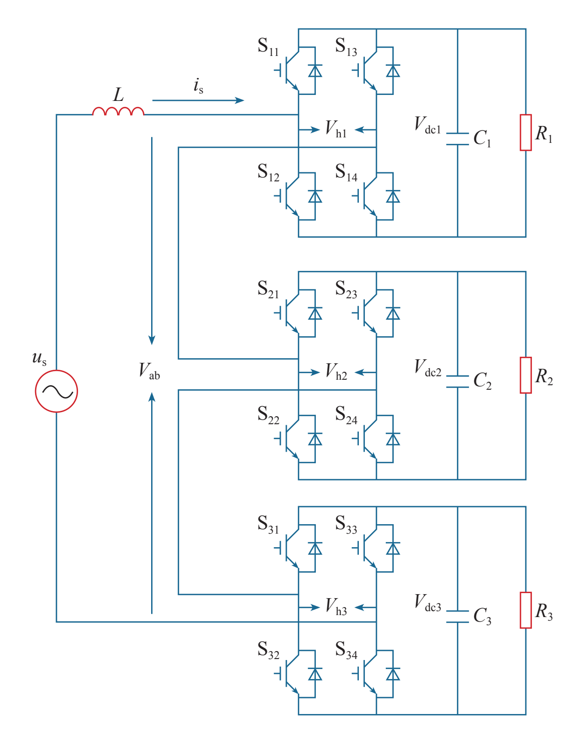


图 3　级联 H 桥变换器拓扑图

Fig.3　Topology of cascaded H-bridge transformer

每个 H 桥可以输出 U_{dc}、0、$-U_{dc}$ 三种状态，定义每个 H 桥的三种状态为

$$F_i=\begin{cases}U_{dc} & S_{i1}、S_{i4}开通\\ 0 & S_{i1}、S_{i3}(S_{i2}、S_{i4})开通\\ -U_{dc} & S_{i2}、S_{i3}开通\end{cases}$$

其中 $i=1,2,3$，所以 3 个 H 桥级联 U_{ab} 能输出 $+3U_{dc}$ ~ $-3U_{dc}$ 7 种电平，当有 n 个 H 桥级联时，U_{ab} 最多可以输出 $2n+1$ 个电平。

3.1　扇区判断和矢量时间计算

扇区判断如图 4 所示，其中 U 为信号调制波。设 $U=V_m\sin(\omega t-\theta)$，根据 V_m 与 U_{dc} 的大小判断位于哪个扇区。

在一个开关周期 T 内，由 V_m 所在扇区的最近两个电平合成 V_m。例如，当 V_m 处于第 2 扇区时，

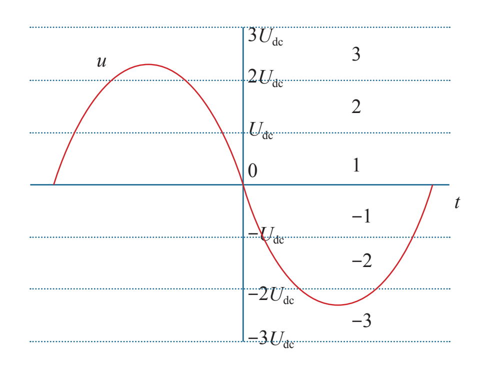


图 4　扇区判断

Fig.4　Judge sector methed

V_m 由大矢量 $\boldsymbol{V}_{max}=2U_{dc}$ 和小矢量 $\boldsymbol{V}_{min}=U_{dc}$ 合成。由伏秒平衡原理可得

$$\begin{cases}\boldsymbol{V}_{min}T_{min}+\boldsymbol{V}_{max}T_{max}=V_mT\\ T_{min}+T_{max}=T\end{cases}\tag{1}$$

解方程组式（1）可得

$$\begin{cases}T_{min}=(V_m-\boldsymbol{V}_{max})T/(V_{min}-\boldsymbol{V}_{max})\\ T_{max}=T-(V_m-\boldsymbol{V}_{max})T/(V_{min}-\boldsymbol{V}_{max})\end{cases}\tag{2}$$

3.2　矢量状态次序

每个电平矢量（除 $\pm3U_{dc}$ 外）都存在冗余矢量，不同的冗余矢量对直流侧电压 U_{ab} 没有影响，但对各个 H 桥直流侧电容电压作用效果不同。为了增强 SVPWM 对任意电平级联 H 桥多电平变换器的通用性，防止出现电平越级跳变现象，本文简化冗余矢量的选取规则，规定正矢量由 0 和 1 两个状态组成；负矢量由 0 和 −1 两个状态组成。为了保证各个 H 桥的直流电容电压的充放电时间相同，每个冗余矢量的作用时间一致。为了防止出现反极性的脉冲，产生反向转矩，任意一次电压矢量的变化最多只能有一个桥臂的开关动作 [13]。级联 3-H 桥的矢量状态次序见表 1。

表 1　级联 3-H 桥矢量状态次序

Tab.1　State switch sequence cascaded three-H bridge

扇区 \ 时间	$T_{min}/3$	$T_{max}/3$	$T_{min}/3$	$T_{max}/3$	$T_{min}/3$	$T_{max}/3$
3	110	111	011	111	101	111
2	100	110	010	011	001	101
1	000	100	000	010	000	001
−1	000	−100	000	0−10	000	00−1
−2	−100	−1−10	0−10	0−1−1	00−1	−10−1
−3	−1−10	−1−1−1	0−1−1	−1−1−1	−10−1	−1−1−1

3.3 电容电压平衡控制

即使每个 H 桥直流母线电容的充放电时间相同，但由于各 H 桥损耗不同、系统延时不同步等原因会导致各个电容电压存在差别。当开关管 S_{i1} 和 S_{i3} 开通或 S_{i2} 和 S_{i4} 导通时（$i=1,2,3$），电容被旁路。当开关管 S_{i1} 和 S_{i4} 或 S_{i2} 和 S_{i3} 导通时，电流流向对电容电压的影响如图 5 所示。由图 5 可知，当电容的电压和电流方向相同，即 $\boldsymbol{iV}_{\mathrm{h}} \geqslant 0$，电容电压上升，当电容的电压和电流方向相反时，即 $\boldsymbol{iV}_{\mathrm{h}} \leqslant 0$，电容电压下降[14]。

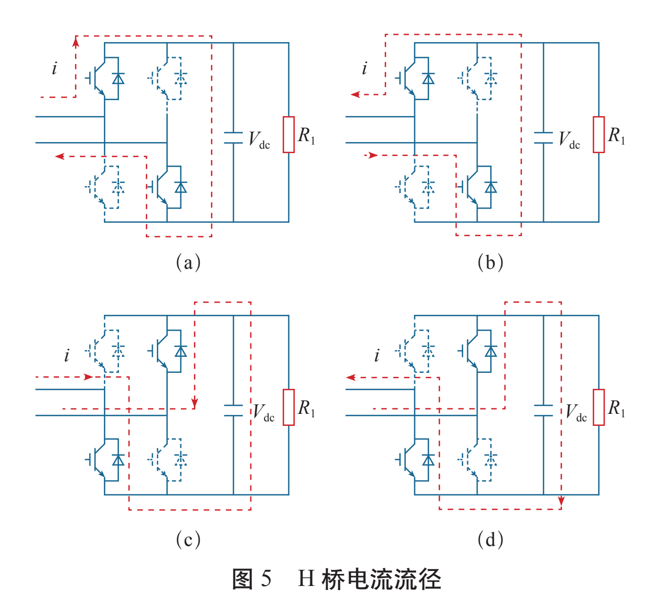


图 5 H 桥电流流径

Fig.5 Current path of H bridge

分析表 1 的矢量状态表可知，在扇区 2、1、−1、−2 中都存在矢量 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{dc}}$，如级联 H 桥变换器工作在 001 矢量时，H 桥 3 的直流电容工作在充放电状态，H 桥 1 和 H 桥 2 被旁路。在 2、1、−1、−2 这些扇区中，状态 001、100、010 的工作时间都相同。当 H 桥直流电容电压出现不平衡时，根据 H 桥的电容电压和电流方向来判断电容的充放电状态，然后在保证 001、100、010 这三个状态总的工作时间不变的情况下，通过分别控制这三个状态的工作时间来调节各个 H 桥的直流电容电压使之平衡，具体如图 6 所示。如当调制波 u 处于扇区 2 时，状态 001 的工作时间增加 $d_1T_{\min}/3$；状态 010 的工作时间增加 $d_2T_{\min}/3$；为了保证这三个状态的工作总时间不变，状态 010 的工作时间为 $(1-d_1-d_2)T_{\min}/3$，防止状态 010 的时间出现负数 $-T_{\min}/6 \leqslant d_1 \leqslant T_{\min}/6$、$-T_{\min}/6 \leqslant d_2 \leqslant T_{\min}/6$。

随着级联 H 桥数量的增加，需要控制的变量 d_n

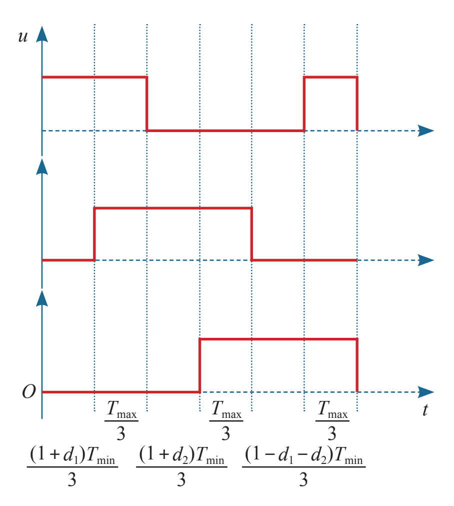


图 6 电压平衡 SVPWM 波形

Fig.6 SVPWM waveforms of voltage balance

（$n=1,2\cdots$）也随着增加，控制的难度也随之加大。为了更好地控制这些变量，使每个 H 桥电容电压平衡，提出一种控制一个 H 桥直流母线电压，其他 H 桥跟随控制来平衡各个 H 桥电容电压的策略。以 3 个 H 桥级联为例，以第一个 H 桥为主控制，控制使 H 桥直流电容电压为设定值 $V_{\mathrm{dc1\text{-}ref}}$，其他 H 桥跟随第一个 H 桥对直流电容电压进行调整，使每个 H 桥电容电压达到平衡。控制策略如图 7 所示。

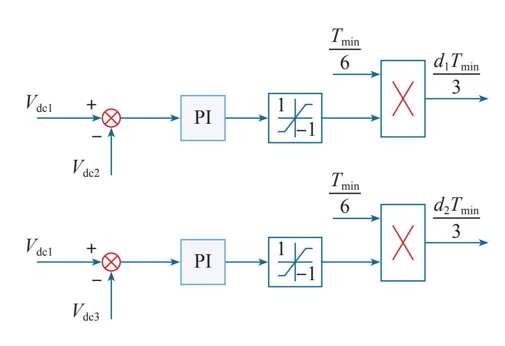


图 7 跟随控制器

Fig.7 Trace controller

4 控制策略

4.1 级联 H 桥控制策略

为了实现 AC/DC 侧无静差控制，本文采用单相 dq 变换控制策略。单相 dq 变换原理跟三相 dq 变换原理相似，都是通过坐标变换将三相交流变成直流，从而可以用 PI 实现无静差控制，然后将直流通过坐标反变换变成交流产生 PWM 波。单相 dq 变换的控制策略如图 8 所示，通过增加一个滞后电流 i 90° 相位的虚拟电流。其中，V_{dc1} 为级联 H 桥第一个 H 桥的电容电压。am/dq 变换矩阵为

$$\boldsymbol{T} = \mathrm{am}/dq = \begin{pmatrix} \sin\theta & -\cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \end{pmatrix} \tag{3}$$

dq/am 变换矩阵为

$$\boldsymbol{T}^{-1} = dq/\mathrm{am} = \begin{pmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ -\cos\theta & \sin\theta \end{pmatrix} \tag{4}$$

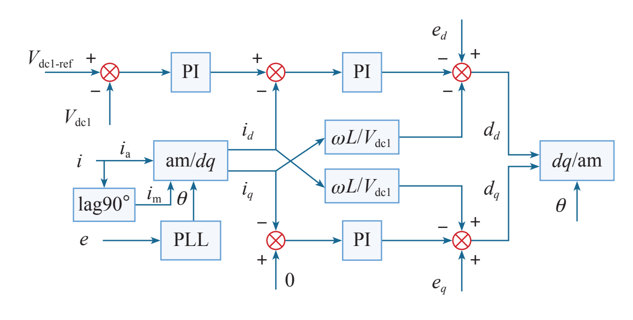


图 8　单相 dq 变换控制策略图

Fig.8　Strategy of single phase dq transform

4.2　移相全桥 DC/DC 变换电路控制策略

移相全桥 DC/DC 变换电路采用移相的 PWM 波控制开关管来实现能量的双向流动。控制策略如图 9 所示，先采用下垂控制提供参考电压 $U_{\text{dc-ref}}$，然后用电压外环、电流内环控制直流母线电压使直流母线电压等于参考电压。其中，$U_{\text{dc-set}}$ 为直流母线参考电压，U_{dc}、i_{r} 分别为直流母线电压和输出电流。

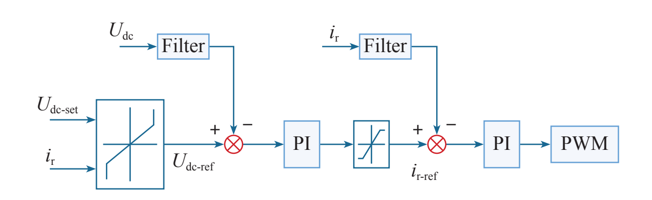


图 9　移相全桥 DC/DC 控制结构图

Fig.9　Control structure of DAB

5　仿真

为了验证所提的单相级联 H 桥电压平衡控制的 SVPWM 策略和固态变压器控制策略的正确性，本文在 Matlab/Simulink 基于 3 个 H 桥单元的固态变压器进行仿真。仿真参数见表 2。

电网侧电压如图 10a 所示，AC/DC 采用 3 个单元的 H 桥实现了 7 电平运行，电网侧电流和电压的波形如图 10b 所示，可以看出电网工作在单位功率因数；图 10c 为电网侧电流，电网电流谐波小，减小了固态变压器对电网影响。

表 2　仿真参数

Tab.2　Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
电网电压 /V	220	直流母线电压 /V	400
H 桥电容电压 /V	200 × 3	交流负载端口电压 /V	220
AC/DC 开关频率 /kHz	10	低压直流负载电压 /V	20
DC/DC 开关频率 /kHz	10	负载电阻 /Ω	5

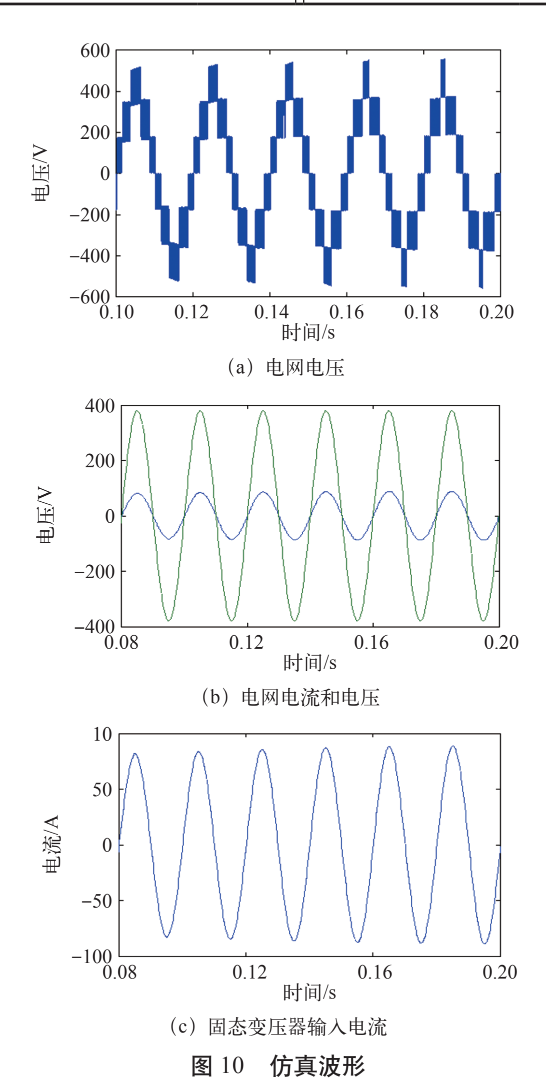
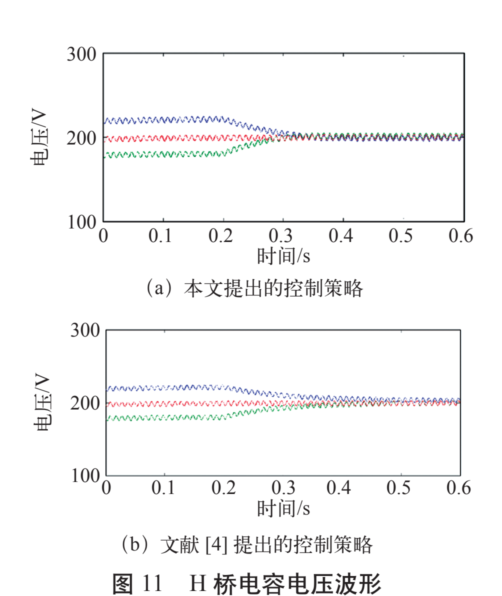


图 10　仿真波形

Fig.10　Simulation waveforms of experiment

图 11 为固态变压器 AC/DC 部分仿真波形图，仿真开始时，电容电压平衡控制处于屏蔽状态，3 个 H 桥所接等效电阻分别为 12、8、16Ω。由图 11 可知 3 个电容电压处于不平衡状态，第一个 H 桥直流母线电压由于单相 dq 变换控制等于 200V，在 0.2s 时，电容电压平衡控制开始作用，第二、第三个 H 桥的电容电压向第一个 H 桥的电容电压迅速靠近，达到平衡状态。通过对比分析图 11 的结果，当电压不平衡时，本文所提控制策略与文献 [4] 所提控制策略都能在短时间内实现直流侧电压平衡。



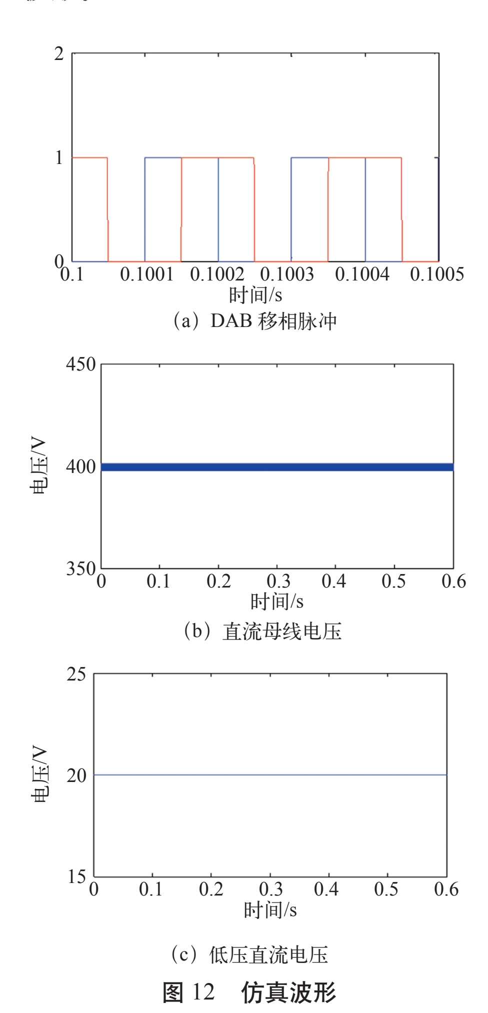
（a）本文提出的控制策略

（b）文献 [4] 提出的控制策略

图 11　H 桥电容电压波形

Fig.11　Capacitor voltage waveforms of H bridge

如图 12 所示，图 12a 为固态变压器中移相全桥 DC/DC 变换器的移相 PWM 波，通过控制移相角来实现能量的双向流动；图 12b 为固态变压器直流母线端口电压波形；图 12c 为固态变压器低压直流端口电压波形。



（a）DAB 移相脉冲

（b）直流母线电压

（c）低压直流电压

图 12　仿真波形

Fig.12　Simulation waveforms of experiment

6　结束语

固态变压器作为能源互联网中的核心装置在能量协调与转换中起到非常重要的作用。本文针对固态变压器前侧 AC/DC 侧的级联 H 桥提出了一种单相多 H 桥的 SVPWM 方法，并为了解决多个 H 桥电路中存在的电容电压不平衡问题，提出控制一个 H 桥电路电压，其他 H 桥跟随控制的策略，最后通过仿真证明了上述方法的正确性。

参考文献

[1] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(O1): 133-148.

[2] Huang A Q. FREEDM system-a vision for the future grid[C]. Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, MN, 2010: 1-4.

[3] Dujic D, Zhao C, Mester A, et al. Power electronic traction transformer-low voltage prototype[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5522-5534.

[4] 苟伟．一种模块级联固态变压器及其控制策略的研究 [D]．杭州：浙江大学，2013．

[5] 吴瑕杰，熊成林，侯聂，等．一种适用于任意电平数三相级联 H 桥变换器的简化多电平 SVPWM 算法 [J]．中国电机工程学报，2016，36(10)：2753-2761．
Wu Xiajie, Xiong Chenglin, Hou Nie, et al. A simplified multilevel space vector pulse width modulation algorithm for three-phase cascaded H-bridge converters with any level[J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(10): 2753-2761.

[6] 葛俊杰，赵争鸣．级联型电压自平衡固态变压器 [J]．清华大学学报 (自然科学版)，2013，54(4)：459-464．
Ge Junjie, Zhao Zhenming. Cascaded voltage self balancing solid state transformer[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 54(4): 459-464.

[7] Xu She, Alex Q Huang. 3-D space modulation with voltage balancing capability for a cascaded seven-level converter in a solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3778-3789.

[8] Zhao F, Wang G, Bhattavhrya S, et al. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter based solid state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2013, 28(4): 1523-1532.

[9] 王顺亮，宋文胜，冯晓云．一种单相级联 H 桥整流器 SVPWM 及其电容电压平衡控制方法 [J]．铁道学报，2016，07：26-33．
Wang Shunliang, Song Wenbing, Feng Xiaoyun. A SVPWM method with capacitor voltage balancing control for single phase cascaded H-bridge rectifiers[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(7): 26-33.

[10] Zhao T F, Wang G Y, Bhattacharya S, et al. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1523-1532.

[11] Bhattacharya S, Zhao T F, Wang G Y, et al. Design and development of generation-I silicon based solid state transformer[C]. In Proc. 25th IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. , 2010: 1666-1673.

[12] 吴剑．模块级联型三相固态变压器及其控制策略的研究 [D]．杭州：浙江大学，2015．

[13] 高虎军．移相全桥 DC/DC 变换器的设计与研究 [D]．西安：长安大学，2013．

[14] 苑春明．三电平变换器 SVPWM 关键技术研究 [D]．合肥：合肥工业大学，2008．